

# Exploració computacional i psicofísica de l'origen de les categories del color

Aleix Parareda-Fortuny

**Resum**— Aquest article presenta un estudi sobre l'origen de les categories del color tan perceptualment com computacionalment. A partir d'un estudi previ que s'explica de manera detallada en el cos d'aquest article, s'ha generat un model computacionalment capaç d'assignar a cada punt d'una imatge, la seva pertinença a cada una de les onze categories definides per B.Berlin i P.Kay. Aquest model es basa en la creació d'un conjunt de funcions el·líptiques que defineixen les fronteres de cada color. Al final de l'article es presenten els resultats obtinguts juntament amb la discussió i justificació corresponents.

**Paraules clau**— aparença del color, categorització del color, cielab, fronteres del color, LMS, IsY.

**Abstract**— This paper presents a study about the origin of both perceptual and computational color categories. This paper is based on a previous study explained in detail in the body of this article. The study presented on this paper has generated a computational model capable of assigning each point of an image to the category it belongs based on eleven defined by B.Berlin and P.Kay. This model is based on the description of a set of elliptic functions that define the boundaries of each color. Results along with discussion and corresponding justification are presented at the end of the article.

**Index Terms**— Cielab, color appearance, color boundaries color categorization, color naming, LMS, IsY.



## 1 INTRODUCCIÓ

L'acte de diferenciar un color de l'altre ha estat un aspecte força significatiu durant l'evolució de l'ésser humà. Tot i que actualment sembla una acció trivial, els primers micos, que només tenien dos cons, no eren capaços de diferenciar gaires colors.

Es creu que el primer mico que va mutar genèticament i va desenvolupar un tercer con, va ser capaç de diferenciar el color vermell de la poma sobre un fons verd, [1][2][3] fet que li va permetre gaudir d'un nivell de vida millor i reproduir-se transmetent els seus gens millorats als seus fills. [4] Aquesta hipòtesi va ser recolzada més tard per Regan et al. (1998,2001) [5][6], qui va realitzar un estudi a la Guinea Francesa mesurant les propietats espectrals de la fruita respecte al fullatge en diferents condicions d'il·luminació natural. L'estudi va revelar que els fotopigments de l'aluata vermell (alouatta seniculus) i altres micos amb receptors tricromàtics estaven optimitzats per detectar la fruita respecte al fullatge.

La vista és, possiblement, el sentit més important de l'ésser humà, si més no el més indispensable. L'ull és l'òrgan de la vista, i la retina és la part de l'ull on es projecta la imatge de tot el que veiem. Aquesta està formada per dos tipus de cèl·lules sensibles a la llum anomenades cons i bastons. En concret, la retina conté 6.5

milions de cons i 120 milions de bastons. Els bastons funcionen principalment en condicions de baixa lluminositat i proporcionen la visió acromàtica, per altra banda, els cons estan adaptats a les situacions de molta lluminositat i proporcionen la visió en color.

Des de fa molts anys, la ciència ha fet estudis per tal d'anomenar els colors i definir-ne els límits. Un dels estudis més importants realitzat sobre aquest tema el van fer B.Berlin i P.Kay [7] l'any 1969 i va demostrar que en totes les cultures sempre han mantingut el mateix ordre a l'hora d'anomenar els onze primers colors. Això significa que partint d'una base en la que només es coneixia el blanc i el negre els altres colors s'han anat introduint en el vocabulari seguint un mateix ordre: blanc, negre, vermell, verd, groc, blau, marró, púrpura, rosa, taronja i gris. A partir del dotzè color comença a haver-hi divergència respecte a la zona geogràfica. Tot i que aquest model hagi rebut crítiques [8][9] amb els anys molts estudis han acabat recolzant-lo [10][11] tot i que amb algunes modificacions.

En aquest treball final de grau s'ha estudiat la categorització del color en les onze classes abans esmentades. S'han tractat aquests onze colors, ja que són els que coincideixen en totes les regions del món a l'hora d'anomenar-los ordenadament. La feina que s'ha realitzat ha estat l'exploració d'uns paràmetres extrems dels estudis realitzats per Benavente et al. (2009) [12] i Párraga et al.(2013) [13] sobre la percepció del color per tal de trobar les onze funcions de pertinença a cadascuna de les categories.

- E-mail de contacte: aleix0404@gmail.com
- Menció realitzada: Computació
- Treball tutoritzat per: Alejandro Párraga (Ciències de la Computació)
- Curs 2013/14

## 2 OBJECTIUS

### 2.1 Objectius crítics

1. Generar un model computacional capaç d'assignar a cada punt d'una imatge (píxel) la seva pertinença a cada una de les onze categories definides per Berlin i Kay.

### 2.2 Objectius Principals

2. Parametritzar els punts observats per tal d'extreure les funcions de pertinença.
3. Utilitzar els onze colors definits originalment per Berlin i Kay (1969) [7], on cada funció correspon a un dels següents colors: blanc, negre, vermell, verd, groc, blau, marro, púrpura, rosa, taronja i gris.
4. Trobar els centroides de cada funció (clúster).
5. Definir les fronteres de cada color (funció)
6. Trobar l'espai de color on millor es representin les dades.
7. Trobar les matrius de transformació entre els diferents espais de colors.

### 2.2 Objectius Secundaris

8. Trobar per a cada cas la funció més específica possible per a cada categoria, de manera que no hi hagi ambigüitats.
9. Representar cada una de les funcions en un gràfic tridimensional conjunt per observar la seva forma i la proximitat dels seus dominis.

## 3 ESTAT DE L'ART

Un dels estudis més actuals és el que es presenta a l'article de Cao et al [14] en el que es presenta un experiment molt semblant al realitzat en aquest treball final de grau. Mitjançant l'espai de color OSA-UCS es van obtenir els valors corresponents dels cons L, M i S per tal de poder mostrar les cromicitats dels cons associades amb els vuit colors utilitzats per Boynton i Osen's [15].

Altres models basats en els aspectes de percepció van ser proposats en el seu dia, com Jemerson i Hurvich [16]. Segons aquest model, el groc i el blau no són ni vermell ni verd i són considerats el punt entremig entre el verd i el vermell. És a dir, en una creu perpendicular una de les línies es correspondria amb la distància groc-blau i l'altra verd-vermell. El punt entremig d'un és la frontera que

defineix la diferència dels altres dos colors. Però es tractava d'un model lineal de la mateixa manera que ho eren els proposats per Ayama et al [17] i Burns et al [18]. Aquests models han anat evolucionant al llarg dels anys fins a adoptar la forma el·líptica usada en l'esmentat article de Cao et al. [14] i de les que també s'ha fet ús en aquest treball.

La línia d'estudi més avançada respecte a aquest tema de l'estudi de la percepció del color és la de Christoph Witzel i Karl R. Gegenfurtner [19] on de la mateixa manera que es fa en aquest treball, caracteritza el "prototipus" com el centre del color i els límits com les seves fronteres. Els límits de la categoria es defineixen mitjançant un procediment d'assignació de noms de colors i es mesuren ajustant el color. En aquest estudi s'han analitzat les categories per colors "iso" il·luminats així com les diferències que pateixen els colors mitjançant les diferències de nivells de lluminositat. Això és degut a la similitud entre les categories de colors "iso" il·luminades i els colors clars.

Els colors "iso" il·luminats es classifiquen com a colors clars pel fet que les categories de color actuals són rudimentàries, és a dir, han anat apareixent nous colors amb l'evolució i el pas dels anys però els existents no s'han modificat.

En aquest estudi es mesuren els l·lindars de la discriminació en l'espai de color Derrington-Krauskopf-Lennie (DKL) en forma d'el·lipse [20].

El fet que tots els estudis actuals parteixin de la mateixa hipòtesi sembla ser un indicatiu de la validesa de la que es planteja en aquest treball.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Experiment Inicial

La base experimental d'aquest estudi és un conjunt d'experiments realitzat per Benavente, et al (2009) [12] l'objectiu dels quals és determinar les fronteres perceptuals entre un conjunt de colors. En aquests experiments els subjectes, vuit persones de parla anglesa nativa, tancats a una habitació fosca front un monitor CRT, van haver de determinar el punt en què es veien incapaços de definir quin era el nom del color mostrat a l'interior d'un marc quadrat de línies negres respecte a dos noms de color donats.

El primer dels dos experiments va permetre als subjectes variar la tonalitat del color mostrat per tal de definir la frontera perceptual entre els dos colors.

El segon experiment els va permetre variar la saturació del color per tal de definir la frontera entre el gris i el color mostrat.

Ambdós experiments es van repetir pels valors de luminància 36, 58 i 81. Aquests valors s'han escollit per tal de tenir mostres en diferents nivells de luminància, ja que alguns colors només són visibles a un nivell determinat.

Aquest experiment es va repetir per les onze fronteres de colors i també entre dos tipus de backgrounds, un fons gris de mitjana intensitat i un fons de Mondrian, que és un fons de quadrats de colors. Aquests quadres de color es van canviar per cada comparació de manera que cap fons de Mondrian es va repetir.

Tota la informació generada va ser guardada en un full de càlcul on els punts trobats eren representats en l'espai de color CIEL\*a\*b\*.

## 4.2 Funcions de transformació

Per poder desenvolupar aquest treball, s'ha implementat un conjunt de funcions que permeten la transformació entre un espai de color i un altre. Els espais de color que s'han utilitzat han estat CIE 1976 L\*a\*b\*, CIE 1931 XYZ, LMS, lsY i RGB.

L'espai de color CIE 1931 XYZ va ser el primer que es va desenvolupar amb l'objectiu d'aconseguir la uniformitat perceptual. A més, aquest espai és fonamental, ja que permet obtenir la transformació als espais de colors relacionats a la figura 2.

L'espai de color CIEL\*a\*b\* (estrictament CIE 1976 L\*a\*b\*) és gairebé uniforme perceptualment, això significa que un canvi d'una determinada quantitat en un color en qualsevol de les components ha de produir un canvi de la mateixa importància visual. La seva component L s'assembla a la percepció que tenim els humans de la luminància. Aquest valor està comprès entre 0 i 100. L'experiment anteriorment esmentat s'ha mesurat en aquest espai de color, aprofitant aquestes característiques.

L'espai de color LMS és representat per la resposta dels tres tipus de cons de l'ull humà. El nom d'aquests receptors de llum, LMS, correspon a la seva capacitat de resposta (sensibilitat) de longituds d'ona llargues, mitjanes i curtes respectivament (figura 1).

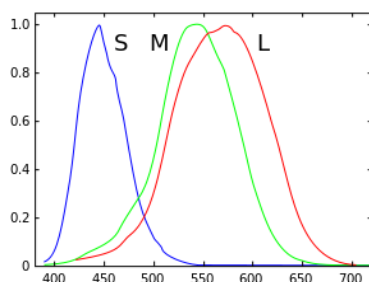


Figura 1. Resposta normalitzada de l'espectre dels tipus cons L, M i S [21]

L'espai de color lsY és l'espai on s'han creat el conjunt de les el·lipsoïdes. S'ha treballat amb aquest espai a causa del seu funcionament. Algunes hipòtesis com Macleod i Boyton [22] apunten que el funcionament d'aquest espai de color és similar al que fan servir les neurones per captar la informació dels cons (L,M,S) d'on s'obtenen els canals l i s, i la luminància (Y). A partir d'aquests valors el cervell decideix si un píxel és d'un color o no. Tot i que no s'han trobat neurones per si soles, hi ha evidències [23] de grups de neurones que s'activen quan perceben un determinat color.

L'espai de color RGB només ha estat utilitzat en l'última part del treball, per tal d'anomenar qualsevol punt en components RGB amb el color que li pertany. S'ha utilitzat aquest espai de color per prendre aquesta mostra, perquè és un dels espais de color més comuns. De tota manera aquests valors s'han hagut de convertir a l'espai lsY passant per diversos espais de colors per tal de poder operar amb ells (veure figura2).

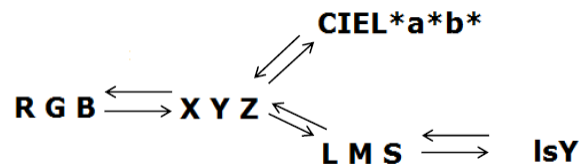


Figura 2. Diagrama de transformacions entre els diferents espais de color utilitzats.

### 4.2.1 CIELAB a XYZ i viceversa

Aquesta funció és una de les més importants, ja que els valors d'entrada es troben a l'espai CIEL\*a\*b\* i per poder realitzar la transformació d'aquests valors a l'espai LMS o lsY s'han d'haver transformat primerament a l'espai XYZ, tal com es pot veure a la figura 2.

Per realitzar la transformació de l'espai CIEL\*a\*b\* a XYZ s'ha utilitzat l'algorisme que es mostra a l'equació 1 [24].

$$Y = Y_n f^{-1}\left(\frac{1}{116} (L^* + 16)\right)$$

$$X = X_n f^{-1}\left(\frac{1}{116} (L^* + 16) + \frac{1}{500} a^*\right)$$

$$Z = Z_n f^{-1}\left(\frac{1}{116} (L^* + 16) + \frac{1}{200} b^*\right)$$

$$f^{-1}(t) = \begin{cases} t^3 & \text{si } t > \frac{6}{29} \\ 3 \left(\frac{6}{29}\right)^2 \left(t - \frac{4}{29}\right) & \text{en cas contrari} \end{cases}$$

Equació 1. Conversió Cielab a XYZ

Per altra banda la transformació inversa és la que es reflexa a l'esquació 2.

$$L^* = 116 f\left(\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16\right)$$

$$a^* = 500 \left[ f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right]$$

$$b^* = 200 \left[ f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right]$$

$$f(t) = \begin{cases} t^{\frac{1}{3}} & \text{si } t > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \frac{1}{3} \left(\frac{29}{6}\right)^2 t + \frac{4}{29} & \text{en cas contrari} \end{cases}$$

Equació 2. Conversió XYZ a Cielab

#### 4.2.2 XYZ a LMS i viceversa

Aquesta funció transforma els valors XYZ a LMS multiplicant-los a través d'una matriu 3x3, on M ha estat definida per Boynton Space fundamentals [15].

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

$$\text{on } M = \begin{bmatrix} 0.15516 & 0.54308 & -0.03287 \\ -0.15516 & 0.45692 & 0.03287 \\ 0 & 0 & 1.0066 \end{bmatrix}$$

Equació 3. Conversió XYZ a LMS

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M' \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix}$$

$$\text{on } M' = \begin{bmatrix} 2.9448 & -3.5001 & 0.2105 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9934 \end{bmatrix}$$

Equació 4. Conversió LMS a XYZ

#### 4.2.3 LMS a lsY i viceversa

Aquesta conversió permet transformar les dades d'un espai de color que simula la percepció dels cons (LMS) a un altre espai (lsY) que representa l'associació psicològica del color respecte a l'espai anterior.

$$l = \frac{L}{L+M}; \quad s = \frac{S}{L+M}; \quad y = L+M$$

Equació 5. Conversió LMS a lsY

$$M = \frac{1-l}{l}$$

$$L = \frac{Y}{1+M}$$

$$M' = M \cdot L$$

$$S = s \cdot L + s \cdot M'$$

Equació 6. Conversió lsY a LMS

#### 4.2.4 XYZ a RGB i viceversa

Aquesta funció transforma els valors de RGB a XYZ multiplicant-los a través d'una matriu 3x3 de la següent manera. [25]

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \text{ on}$$

$$M = \begin{bmatrix} 0.4124564 & 0.3575761 & 0.1804375 \\ 0.2126729 & 0.7151522 & 0.0721750 \\ 0.0193339 & 0.1191920 & 0.9503041 \end{bmatrix}$$

Equació 7. Conversió RGB a XYZ

Per últim, per realitzar la transformació de l'espai XYZ a RGB el procediment utilitzat és el mateix canviant la matriu de transformació per la seva inversa.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M' \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

$$\text{on } M' = \begin{bmatrix} 3.2404542 & -1.5371385 & -0.4985314 \\ -0.9692660 & 1.8760108 & 0.0415560 \\ 0.0556434 & -0.2040259 & 1.0572252 \end{bmatrix}$$

Equació 8. Conversió XYZ a RGB

#### 4.3 Tractament de les dades

Després d'haver implementat el conjunt de funcions de transformació necessàries, s'ha extret tota la informació de l'experiment anteriorment esmentat i s'han convertit tots els punts en els diversos espais de color a través de les funcions de transformació anterior. El procediment

seguit ha estat obrir i llegir el fitxer d'entrada i, si cal, crear el fitxer de sortida. Seguidament, cridar la funció de transformació adequada i escriure els punts transformats al fitxer de sortida.

Per estructurar tota la informació generada, s'han creat un conjunt de fitxers que contenen els valors dels píxels ja transformats en els diversos espais de colors. Per fer-ho s'ha seguit una determinada estructura.

A mesura que s'han obtingut els nous valors ja transformats, aquests s'han guardat de manera organitzada en diferents directoris. Així s'ha facilitat l'accés a les dades, ja sigui per operar amb elles o per mostrar-les gràficament.

Com es pot observar a la figura 3, per poder assolir l'objectiu principal del projecte, s'han creat un conjunt de funcions i fitxers que fan possible poder estructurar correctament el codi i obtenir les onze el·lipsoides.

#### 4.4 Cerca de les el·lipsoides.

Per aconseguir la millor el·lipse per cada conjunt de punts estudiat s'ha fet ús de dues funcions, `search_ellipse` i `fminsearch`, que han permès aquesta tasca.

`Search_ellipse` calcula la suma de les distàncies de cada punt respecte al punt més proper de l'el·lipse analitzada. `Fminsearch` [26] [27] és una funció pròpia de Matlab que minimitza una funció escalar de diferents variables a partir d'una estimació inicial. En aquest cas la funció ha estat `search_ellipse` i l'estimació inicial ha estat una el·lipse definida per la posició del seu centre, la mida dels seus semi eixos i l'angle de rotació en radians.

Per millorar el temps de cerca i evitar que la funció explori zones llunyanes, s'han establert uns límits a la funció `search_ellipse`, d'aquesta manera s'ha evitat que la funció defineixi semi eixos que tendeixen a infinit o zero.

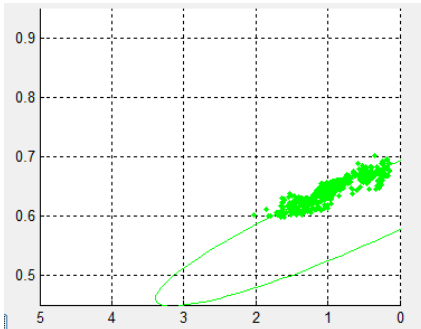


Figura 4. El·lipse sense límits establerts.

Com es pot veure a la figura 4, si no es defineixen els límits mencionats, en alguns casos, les el·lipses tendeixen a créixer en alguna de les seves dimensions de manera desproporcionada. Això és degut al fet que el càlcul de la funció `search_ellipse` calcula la distància dels punts amb el punt de l'el·lipse més proper i si tots aquests punts cauen al mateix costat, aleshores l'el·lipse no és capaç de posicionar-se correctament. Els límits establerts impedeixen que l'el·lipse tingui aquest creixement desproporcionat i per tant s'adapti a la forma del núvol de punts. Els límits establerts per cadascuna de les el·lipses es poden consultar a l'apèndix A1.

Aquest procediment s'ha repetit un total de tres cops per cada color. A cada repetició s'ha variat el paràmetre de la luminància perquè prengui els valors  $L=36$ ,  $L=58$  i  $L=81$  en les seves respectives iteracions. Això és degut al fet que segons la quantitat de luminància, som capaços de veure uns colors o uns altres.

Obtingudes totes el·lipses d'un determinat color, normalment tres, s'ha calculat l'el·lipsoide tridimensional que passa per totes les el·lipses corresponents al color.

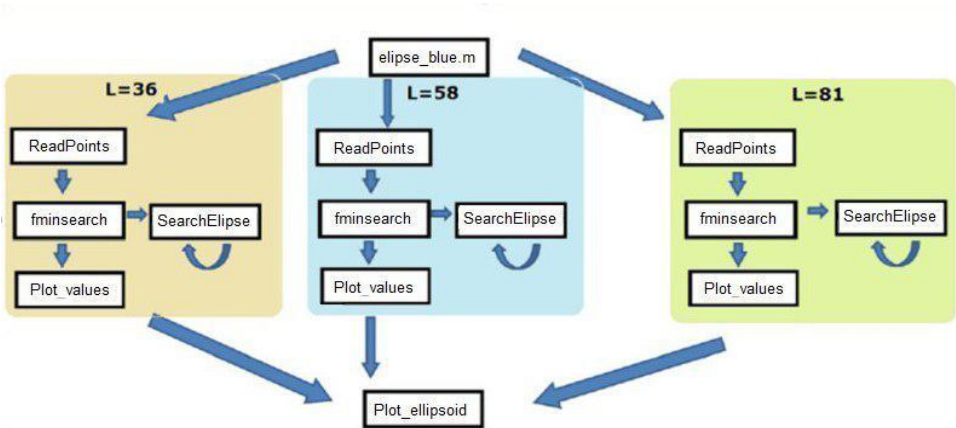


Figura 3. Estructura per a l'obtenció d'una el·lipsoide

## 4.5 Interfície gràfica

Per tal de poder visualitzar els resultats d'aquesta hipòtesi, s'ha creat una interfície senzilla que permet examinar un conjunt d'el·lipsoïdes prèviament seleccionades mentre s'observa el procediment que s'ha seguit a mitjançant dues figures. La primera pertany a la funció *fminsearch*, on s'observa com es va adaptant l'el·lipse inicial a través de crides recursives fins a arribar al resultat òptim explorat.

D'altra banda, la segona figura, va copiant els resultats parcials de l'el·lipsoïde, que depenen dels nivells de luminància que té i guarda a memòria els resultats obtinguts. D'aquesta manera és possible consultar el resultat de les execucions prèvies, cosa que facilita la comparació entre elles.

## 4.6 Determinació si un punt està dins d'una el·lipsoïde

Un cop s'han definit totes les el·lipsoïdes, s'ha desenvolupat un algorisme que és capaç de classificar si, donat punt  $x,y,z$ , aquest pertany a una el·lipsoïde o no i en quina distància es troba.

Per classificar si el punt està situat dins, fora o a la frontera d'una el·lipsoïde, s'ha utilitzat la següent equació [28].

$$\frac{l - l_0}{a} + \frac{s - s_0}{b} + \frac{Y - Y_0}{c} = 1$$

Equació 9.  $l,s,Y$  correspon a les coordenades del punt d'entrada,  $l_0,s_0$  i  $Y_0$  és la posició del centre de l'el·lipsoïde i  $a,b$  i  $c$  són la mida dels semi eixos de l'el·lipsoïde.

Resolta l'equació, per determinar si el punt d'entrada es troba dins, fora o a la frontera de l'el·lipsoïde s'ha tingut en compte la següent casuística. Si el resultat és menor a 1, indica que el punt es troba dins de l'el·lipsoïde, si és superior a 1, indica que el punt es troba fora de l'el·lipsoïde, i si és igual a 1 indica que el punt està just a la frontera.

A més, també s'ha calculat la distància entre el punt i el centre de l'el·lipsoïde mitjançant l'equació de la distància euclidiana entre dos punts.

## 5 RESULTATS

Per l'obtenció de les el·lipsoïdes, s'ha executat el programa diversos cops, variant els punts inicials i provant les diverses configuracions dels paràmetres de la funció *fminsearch* i modificant els límits establerts per a cada color.

Els millors resultats s'han obtingut utilitzant com a paràmetres d'entrada els punts trobats per Cao, et al [14] més uns límits per tal d'optimitzar el temps d'execució acotant la zona de cerca, aquests límits estan degudament explicats a la secció d'apèndix. Com es pot observar, en la taula 1, no hi ha valors de posició a l'eix  $Z$  ni al semi eix  $c$ . Això es degut al fet que la funció *fminsearch* treballa en 2 dimensions. Per aconseguir la tercera dimensió s'ha cridat la funció *fminsearch* tres vegades, cada una corresponent a tres valors de luminància diferents. ( $L=36$ ,  $L=58$  i  $L=81$ ). Així encara que la funció treballi en dues dimensions, l'algorisme és capaç de crear les el·lipsoïdes en tres dimensions (figura 6) traçant les línies de l'el·lipsoïde a través de les tres el·lipses bidimensionals.

### Paràmetres inicials

	posX	posY	posZ	a	b	c	Angle
Verd	0.6	0.75	-	0.06	0.6	-	0.05
Blau	0.61	2	-	0.023	0.851	-	0.01
Lila	0.65	2.1	-	0.025	0.7	-	0.05
Rosa	0.7	1.1	-	0.06	0.6	-	-0.1
Vermell	0.75	0.47	-	0.06	0.5	-	0.05
Taronja	0.74	0	-	0.016	1	-	0.055
Groc	0.7	0.2	-	0.02	0.851	-	0.0188
Marró	0.685	0.231	-	0.007	0.2	-	0.05
Gris	0.661	0.905	-	0.01	0.127	-	0.0508

Taula1. Paràmetres inicials. Pos indica la posició del centre de l'el·lipsoïde i  $a,b,c$  indiquen la mida dels semi eixos. L'angle està expressat en radians.

### Paràmetres finals

	posX	posY	posZ	a	b	c	Angle
Verd	0.6074	0.8313	25.96	0.050	0.700	60	0.0475
Blau	0.6090	1.9420	25.96	0.023	0.851	60	0.0188
Lila	0.6627	2.000	25.96	0.0297	0.7800	60	0.0219
Rosa	0.7350	1.6078	25.96	0.050	0.7000	60	-0.042
Vermell	0.7470	0.4878	18.50	0.0235	0.6322	30	0.0778
Taronja	0.7292	0.0011	42.00	0.0211	1.000	30	0.055
Groc	0.6808	0.199	42	0.0106	0.998	30	0.0171
Marró	0.7045	0.4058	0	0.0304	0.7035	20	0.0366
Gris	0.6514	1.1921	25.96	0.0156	0.400	60	0.0015

Taula2. Centroides de les el·lipsoïdes obtingudes. Pos indica la posició del centre de l'el·lipsoïde,  $a,b,c$  indiquen la mida dels semi eixos i l'angle està mesurat en radians.

A les taules 1 i 2 es poden observar els paràmetres inicials de les el·lipsoïdes i els finals un cop finalitzat el procés. Finalment a la taula 3 s'aprecia quines el·lipsoïdes són les que tarden més a calcular-se. El nombre de crides indica quantes el·lipses s'han calculat. Pels casos del verd, blau, lila, rosa i gris, com que tenim tres nivells de luminància diferents, es necessita fer tres crides. En canvi

per els casos del vermell, taronja i groc, al tenir només dos nivells diferents de luminància fa que el temps d'execució total sigui menor. Per últim, el color marró, només es crida una vegada, ja que només és visible a baixa luminància.

	N crides	Temps	Temps Total
Verd	3	25.6	76,8
Blau	3	10.6	31,8
Lila	3	53.35	160,05
Rosa	3	33.9	101,7
Vermell	2	66.8	133,6
Taronja	2	26.3	52,6
Groc	2	32.3	64,6
Marró	1	69.9	69,9
Gris	3	372	1116

Taula 3. Temps d'execució en segons.

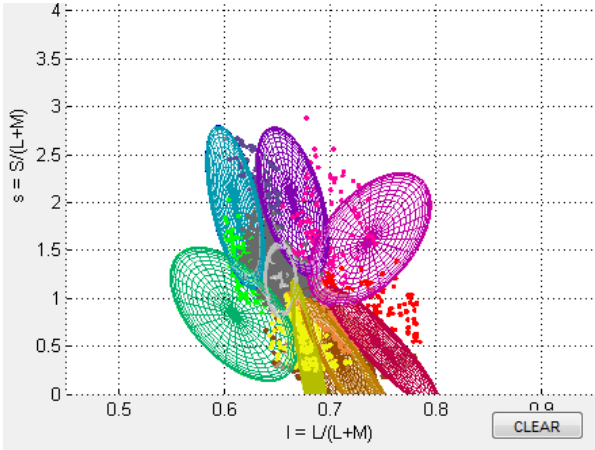


Figura 5. Model amb totes les el lipsoïdes generades. Vista sobre el pla XY.

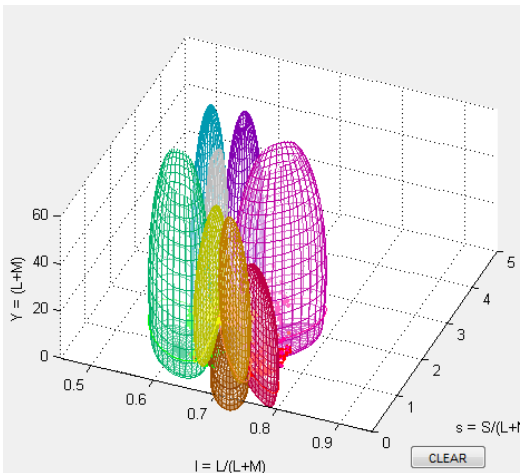


Figura 6. Model amb totes les el lipsoïdes generades. Vista tridimensional.

Cal destacar també que el gris és el color que més tarda perquè conté molts més punts que a la resta dels colors, ja que en l'experiment inicial, es van mesurar totes les fronteres entre tots els colors i el blanc.

Un exemple gràfic d'una d'aquestes fronteres es pot observar a la figura 7, on a distància zero del centre de l'el lipsoïde de color verd tots els subjectes han identificat el color donat com a verd. A mesura que el punt s'allunya del centre comencen a haver-hi discrepàncies a l'hora d'anomenar el color. La distància r, on es pot observar la forta pendent, es correspon amb el límit de l'el lipsoïde.

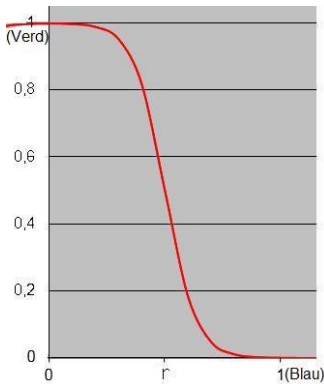


Figura 7. Sigmoide de percepció entre dos colors. A l'eix horitzontal es pot observar la distància del centre de l'el lipsoïde verda al punt donat, on r és la distància de la frontera. A l'eix vertical es pot observar la proporció de subjectes que han afirmat que el punt és verd.

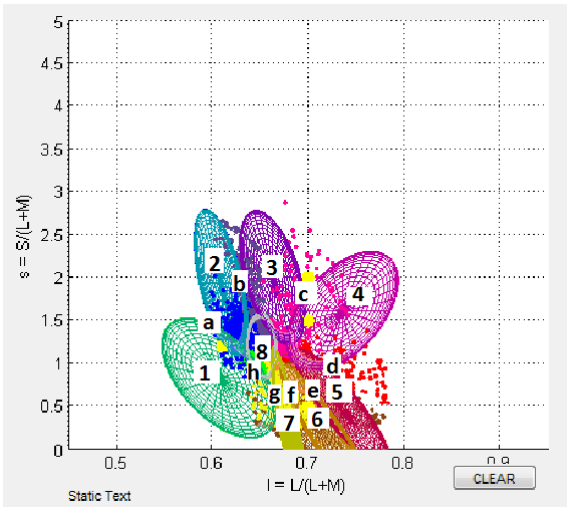


Figura 8. Exemples de punts provats en el model obtinguts. Els nombres corresponen a punts pertenyensa les el lipsoïdes i les lletres a punts de la frontera.

Per tal de validar el model obtingut s'ha realitzat un conjunt de proves utilitzant els punts especificats a la figura 8. Els resultats es poden observar a la taula 4



	I	s	Y	Color	Proper	Verd	Blau	Lila	Rosa	Vermell	Taronja	Groc	Marró	Gris
1	0,58	1	40	Verd	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,61	2	40	Blau	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	0,65	2	40	Lila	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0,75	1,5	40	Rosa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0,76	0,4	40	Vermell	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	0,72	0,25	45	Taronja	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	0,685	0,2	45	Groc	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0,7	0,3	10	Marró	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	0,65	1,25	40	Gris	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	0,58	1,75	40	-	Blau	3	74,52	10,84	6,79	0	0	0	0	4,39
B	0,62	2,74	40	-	Lila	0	14,53	84,89	0,57	0	0	0	0	0
C	0,71	2,2	40	-	Rosa	1,68	13,68	32,56	50	0	0	0	0	1,88
D	0,75	0,9	40	-	Vermell	6,55	0	0	15,75	36,61	10,33	8,53	15,02	7,18
E	0,753	0,2	40	-	Vermell	2,65	0	0	0	54,68	17,7	4,03	20,9	0
F	0,7	0,15	45	-	Groc	22,32	0	0	0	3,47	8,72	50,55	14,9	0
G	0,66	0,2	45	-	Verd	82	0	0	0	1,13	2,66	9,81	4,36	0

Taula 4. I,s,Y representen les coordenades el punt en l'espai de color IsY. Color indica el color al qual pertany el punt en cas que es trobi dins una el·lipsoide, en cas contrari s'especifica - (sense classificar). Proper defineix el color que més s'aproxima als punts sense classificar i a continuació s'indica el percentatge de color de cada punt donat. En els punts que han estat classificats, aquests valors s'indiquen com -, ja que aquests càlculs només pertocuen als punts no classificats.

## 6 CONCLUSIONS

En general crec que el model obtingut és prou satisfactori, perquè classifica correctament la gran majoria dels punts, sobretot els que es troben dins d'alguna de les el·lipsoïdes.

Els punts que es troben fora són classificats a partir d'un conjunt de percentatges de pertinença a cada una de les el·lipsoïdes. Aquesta classificació permet identificar ràpidament el color més similar al punt donat i a més a més saber si es troba molt a prop d'una el·lipsoide (un dels percentatges és molt alt) o a la frontera entre dues o diverses el·lipsoïdes (percentatges uniformes).

En la majoria de casos els punts exteriors són classificats correctament però en alguns altres el model falla, sobretot en zones en què les el·lipsoïdes són molt primes i estan molt juntes, per tant qualsevol petit fall suposa una mala classificació del punt tot i que el resultat dels punt erronis sempre són colors propers.

Per poder decidir quina el·lipsoide està més a prop d'un punt, en un inici es va calcular la distància que hi ha entre el punt i el centre de l'el·lipsoide (distància1). Amb aquesta distància es van calcular els percentatges de pertinença (explicats a la part de metodologia). En la fase de test, es va observar que aquests percentatges no s'ajustaven a la realitat i es va decidir calcular una altra distància, compresa entre el punt donat i el punt més proper de les el·lipsoïdes (distància2).

Amb aquesta nova forma de calcular la distància, els resultats van millorar, ja que amb l'anterior no es tenia en compte la forma de les el·lipsoïdes. Calculant la distància al centre de l'el·lipsoide no es tenia en compte la mida dels eixos d'aquesta, i per tant es descartava el fet que un punt pogues estar proper a un punt del perímetre de l'el·lipse però llunyà al centre.

Les principals dificultats que han sorgit durant el transcurs d'aquest estudi han estat, en primer lloc, entendre el funcionament de la funció `fminsearch` i adaptar-la a aquesta hipòtesi. En segon lloc cal destacar el problema de la dimensió dels eixos, ja que els valors de l'eix  $X(I)$  estan compresos entre 0 a 5 i els de l'eix  $Y(s)$  entre 0 a 1, fet que fa difícil valorar els resultats obtinguts perquè no estan escalats amb el mateix factor en els dos eixos.

També cal destacar que hi ha hagut unes el·lipsoïdes que han suposat un gruix de treball més considerable que la resta, com per exemple la groga i la taronja, ja que com es pot observar a la figura 6, dependent del valor de la luminància, el color pot variar. Això és degut al fet que el groc i el taronja només són visibles amb alta lluminositat.

D'altra banda, el color marró representa el cas contrari, només és visible quan hi ha baixa luminància. Per aquest motiu, tal com es pot veure a la figura 6, donada una coordenada  $x, y$ , segons el grau de lluminositat existent és possible percebre un color o un altre.



Tot i els problemes anteriorment explicats, el treball s'ha desenvolupat en l'espai de color  $IsY$  perquè, com s'ha explicat en l'apartat de metodologia, algunes hipòtesis com la de Macleod i Boyton [22] afirmen que el funcionament d'aquest espai de color s'assimila al que fan servir les neurones per representar la informació rebuda dels cons. A causa de la naturalesa del treball, que parteix d'un experiment psicofísic, crec que portar a terme la representació en aquest espai de color era fonamental per aproximar-nos a la representació de color que fa el cervell.

Per últim tal com es pot observar a la figura 5, hi ha alguns punts de l'espai que pertanyen a dues el·lipsoïdes. Això és degut al fet que el model encara podria ser més refinat. De totes maneres, aquests punts s'han minimitzat de manera considerable respecte l'inici de l'estudi.

La tasca de refinar el model i també de provar altres configuracions per el·lipsoïdes problemàtiques es proposa com a línia futura de treball per tal de millorar el model. Un altre possible treball futur, que no s'ha pogut realitzar per falta de temps, és la comparació dels clústers definits a l'article Exploració computacional de fotografies per trobar l'origen de les categories de color [29] amb les el·lipsoïdes obtingudes amb aquest model.

## AGRAÏMENTS

Vull agrair molt l'ajuda rebuda per part del meu tutor Alejandro Parraga que ha tingut la paciència d'explicar-me tots els dubtes que he tingut i impartir-me els coneixements necessaris per poder dur a terme aquest treball final de grau.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Alien, G. (1879). *The Colour-Sense: Its Origin and Development*. London: Trubner & Co.
- [2] Mollon, J. D. (1989). "Tho she kneel'd in that Place where they grew. . . ." *Journal of Experimental Biology* 146, 21-38.
- [3] Osorio, D. & Vorobyev, M. (1996). Colour vision as an adaptation to frugivory in primates. *Proceedings of the Royal Society of London B* 263,593-99.
- [4] John D. Mollon, Joel Pokorny, and Ken Knoblauch. Normal and Defective Colour Vision.
- [5] Regan, B. C., Julliot, C., Sinunen, B., Vihot, F., Charles-Dominique, P., & Mollon, J. D. (1998). Frugivory and colour vision in *Alouatta seniculus*, a trichromatic platyrrhine monkey. *Vision Research* 38,3321-7.
- [6] Regan, B. C., Julliot, C., Simmen, B., Vitoot, F., Charles-Dominique, R., & Mollon, J. D. (2001). Fruits, foliage and the evolution of the primate colour-sense. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 356,229-83.
- [7] Berlin, B., & Kay, P. (1969). *Basic color terms; Their University and evolution* (pp. 1-178). Berkeley: University of California Press.
- [8] Saunders, B.; van Brakel, J. (1997). "Are there nontrivial constraints on colour categorization?". *Behavior and Brain Sciences* 20 (2): 167-228.
- [9] Wierzbicka, Anna (2006). The Semantics of Colour: A New Paradigm. In Pitchford, N.J. & Biggam, C.P. (Eds.), *Progress in Colour Studies: Volume I. Language and Culture* (pp. 1-24). Philadelphia: John Benjamins Publishing Company.
- [10] Bornstein, Marc H. (2006). Hue Categorization and Color Naming: Physics to Sensation to Perception. In Pitchford, N.J. & Biggam, C.P. (Eds.), *Progress in Colour Studies: Volume II. Psychological Aspects* (pp. 35-68). Philadelphia: John Benjamins Publishing Company.
- [11] Kay, Paul; Maffi, Luisa (1999). "Color Appearance and the Emergence and Evolution of Basic Color Lexicons". *American Anthropologist* 101 (4): 743-760.
- [12] Benavente, R., Parraga, C. A., & Vanrell, M. (2009). Colour categories boundaries are better defined in contextual conditions. *Perception*, 38(Suppl.), 36b.
- [13] Parraga, C.A., Rafegas Fonoll, I. (2013), Colour Categorization From Colour Opponency, *Perception* 42(Suppl.), 109b.
- [14] Cao, D., Pokorny, J., & Smith, V. (2005). Associating color appearance with the cone chromaticity space. *Vision Research*, 45(15), 1929- 1934.
- [15] Boynton, R., & Olson, C. (1987). Locating basic colors in the OSA space. *Color Research & Application*, 12(2), 94-105.
- [16] Jameson, K. A., & Komarova, N. L. (2009a). Evolutionary models of color categorization. I. Population categorization systems based on normal and dichromat observers. *Journal of the Optical Society of America A*, 26(6), 1414-1423. doi:180032.
- [17] Ayama, M., Nakatsue, T., & Kaiser, P. K. (1987). Constant hue loci of unique and binary balanced hues at 10, 100, and 1000 Td. *Journal of the Optical Society of America A*, 4, 1136-1144.
- [18] Burns, S. A., Elsner, A. E., Pokorny, J., & Smith, V. C. (1984). The Abney effect: Chromaticity coordinates of unique and other constant hues. *Vision Research*, 24, 479-489.
- [19] Christoph Witzel and Karl R. Gegenfurtner. Categorical sensitivity to color differences. *Journal of Vision* (2013) 13(7):1, 1-33
- [20] Derrington AM, Krauskopf J, & Lennie P (1984). Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque. *The Journal of physiology*, 357, 241-65 PMID: 6512691.

[21] A. Stockman, L.T. Sharpe, The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype, *Vision Research*, 40 (2000) 1711-1737.

[22] MacLeod, D. I. A. & Boynton, R. M. (1979). Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance. *Journal of the Optical Society of America*, 69(8), 1183-1186.

[23] R. Shapley and M. Hawken. Neural mechanisms for color perception in the primary visual cortex. *Current Opinion in Neurobiology* Volume 12, Issue 4, 1 August 2002, Pages 426–432

[24] Computing Science Department R.I.T[pàgina web]. Lloc edició: Rochester Institute of Technology; data[25/04/2014]. Disponible a: [http://www.cs.rit.edu/~ncs/color/t\\_convert.html](http://www.cs.rit.edu/~ncs/color/t_convert.html)

[25] Bruce Lindbloom [pàgina web]. Lloc edició: Bruce Justin Lindbloom; data[25/04/2014]. Disponible a: [http://www.bruceindbloom.com/index.html?Eqn\\_RGB\\_XYZ\\_Matrix.html](http://www.bruceindbloom.com/index.html?Eqn_RGB_XYZ_Matrix.html)

[26] Mathworks. Pàgina web. Consultada [30/05/2014], disponible a <http://www.mathworks.es/es/help/optim/ug/fmincon.html>

[27] Matlab mathworks. Pàgina web. Data consultada [30/05/2014], disponible a l'adreça <http://www.mathworks.es/es/help/matlab/ref/fminsearch.html>

[28] C. Alejandro Párraga, *Color Vision, Computational Methods for* (2013)

[29] Éric Rey, *Exploració computacional de fotografies per trobar l'origen de les categories de color* (2014)

## APÈNDIX

### A1. Límits de les elipsoides

	pX min	pX max	pY min	pY max	a min	a max	b min	b max
Verd	0	0.8	0	2	0.05	0.3	0.5	0.7
Blau	0	1	0	2	0.03	1	0.5	1
Lila	0.5	0.7	2	5	0.02	1	0.2	0.8
Rosa	0.6	0.8	1	2.5	0	0.5	0.5	0.8
Vermell	0.70	0.8	0.4	0.5	0	0.5	0.1	0.7
Taronja	0.7	0.8	0	0.5	0	0.2	0.1	1
Groc	0.65	0.75	0	0.5	0.01	1	0.8	1
Marró	0.6	0.8	0	1	0	0.5	0	0.8
Gris	0	1	0.5	1.5	0	0.5	0.5	0.75

Taula 5. Valors límits de la funció fminsearch.

Tal com s'ha explicat anteriorment, per tal de poder realitzar execucions més ràpides i evitar que la funció explori zones llunyanes, s'han introduït els límits de la taula 5. D'aquesta manera el temps d'execució s'ha pogut reduir gairebé un 50% i més les elipsoides generades han estat més precises.